La materia y sus nuevas estructuras

por

Genaro Toledo

Este es un capítulo separado que integra el libro

Fronteras de la Física en el Siglo XXI

Octavio Miramontes y Karen Volke (Editores)

CopIt-arXives, 2013
México, D.F.
ISBN: 978-1-938128-03-5

Índice general

Genaro Toledo **La materia y sus nuevas estructuras** **1**
1. Introducción . . . 1
2. Atomismo . . . 2
3. La estructura del átomo y la estructura nuclear . . . 2
4. Comportamiento de los componentes del átomo . . . 4
5. El surgimiento de la idea de partones . . . 5
6. La interacción fuerte como teoría de norma . . . 8
7. Hiperones e Hipernúcleos . . . 10
8. Estados exóticos . . . 12
9. Materia en condiciones extremas . . . 13
10. Perspectivas . . . 15
11. Referencias . . . 16

La materia y sus nuevas estructuras

Genaro Toledo, Instituto de Física, UNAM, México

1. Introducción

Cada objeto material que observamos a nuestro alrededor está formado por una colección de elementos más pequeños, cuyas propiedades determinan las características del objeto que forman. De esta observación surgen dos preguntas muy importantes: i) Si esto es válido para objetos cada vez más pequeños, ¿existe el objeto último que ya no es una colección de elementos? ii) Si se manipulan las propiedades de los elementos, ¿se pueden modificar las características del objeto que conforman?

En éste capítulo abordamos estas preguntas de manera conjunta, mostrando los grandes logros alcanzados hasta el momento en la búsqueda del elemento último y las inmensas posibilidades de crear nuevos objetos, utilizando el conocimiento de las propiedades de los elementos conocidos. Para dar una perspectiva amplia, comenzamos con una breve revisión del concepto de átomo. El saber que éste tiene estructura, nos llevará a introducir a los electrones y al núcleo atómico como sus componentes, identificaremos a los electrones como un tipo de elementos llamados leptones, mientras que el núcleo veremos que está formado por otros tipos de elementos, los protones y neutrones, los que a su vez están compuestos de otros elementos llamados quarks, de los que existen seis tipos. De entre ellos, sólo dos forman naturalmente a los neutrones y protones. En este punto será relevante describir a la interacción fuerte entre quarks. Veremos que la magnitud de ésta interacción es diferente dependiendo de la energía a la que ocurre. Mientras que a bajas energías es efectivamente muy intensa, haciendo que los quarks se liguen y formen grupos como los protones y neutrones, a altas energías esta interacción decrece considerablemente lo que permite a los quarks una libertad aparente.

Lo descrito anteriormente nos llevará a preguntarnos qué tipo de grupos se pueden formar, haremos énfasis en los llamados hiperones los cuales incluyen un tipo de quark distinto a los que forman al protón y al neutrón, y si estos a su vez pueden formar un tipo nuevo de núcleos, los llamados hipernúcleos. Más aún, nos preguntaremos cuántos quarks son necesarios para formar a estos grupos. Mostraremos entonces a los llamados estados exóticos que contienen un número mayor de quarks que los que forman a un

protón. Con las características de la interacción fuerte, veremos cómo se comporta la materia en condiciones extremas de temperatura o densidad. Lo primero se hace explorado experimentalmente colisionando núcleos pesados a altas energías; mientras que para el segundo caso, se estudia la materia y sus propiedades en el interior de las estrellas de neutrones. Todos estos aspectos son líneas de investigacíon activa y con el progreso alcanzado en este campo, concluiremos dando una perspectiva para este siglo, el cual se perfila como uno en el que bien podrían descubrirse nuevas estructuras de la materia.

2. Atomismo

El concepto de elemento último existía en la India y la Grecia antigua (Demócrito 450 AC), pero más allá del terreno especulativo, no existía el conocimiento científico ni la capacidad tecnológica para adentrarse en estos objetos más allá de unas cuantas micras[1]. Así, podemos entender que una roca caliza al ser triturada resulta en pequeños residuos con propiedades similares a las de la roca original. Es hasta el siglo XIX que el uso de métodos más elaborados para el estudio y la caracterización sistemática de los materiales dieron como resultado la identificación de elementos los cuales podían ser entendidos como de un solo tipo o átomo y que su combinación daba lugar a los compuestos químicos. Este resultado se debe a John Dalton, quién postuló la primera teoría científica del atómo en 1805.

Esta versión de la estructura de la materia tiene su representación más práctica en la llamada Tabla periódica de los elementos propuesta por Dmitri Mendeléyev en 1897 [1]. Así, por ejemplo, un átomo de oxígeno puede combinarse con dos átomos de hidrógeno para formar un objeto denominado molécula de agua con un tamaño típico de 3 Angstroms con propiedades físicas y químicas distintas a la de los átomos con los que fue creado[2]. Esta simple observación nos permite apreciar el gran potencial que representa conocer a todos los átomos y sus propiedades. Si podemos combinarlos en formas novedosas, podemos crear materiales con nuevas características. Las innovaciones en materiales que vemos en nuestros días es fruto de la carrera tecnológica en esta dirección[3]. La búsqueda de estos nuevos materiales no es a ciegas, ésta explota las propiedades intrínsecas de los átomos mismos.

3. La estructura del átomo y la estructura nuclear

El átomo está formado, a su vez, por otros elementos más pequeños: protones, neutrones y electrones. En su parte central se concentran los protones y neutrones formando un núcleo al cual le circundan los electrones. En este punto es importante establecer las

[1] Un grano de polvo mide aproximadamente una micra ($1\mu m = 10^{-6}$ m).
[2] 1Å$= 1 \times 10^{-10}$ m. 1Å es el valor típico del tamaño de un átomo.
[3] Véase "Los nuevos materiales del siglo XXI" de Gonzalo González en este mismo libro.

características de estos elementos básicos para entender al átomo. Algunas de sus propiedades relevantes son: la masa (M), la carga eléctrica (Q_e) y el espín (s). En la Tabla 1 se presentan algunos propiedades de los componentes del átomo.

Consideremos, en esta imagen, la forma en que se construye un átomo. El átomo más simple es el de Hidrógeno, con un protón constituyendo el núcleo y un electrón orbitando. Dado que ambos tienen cargas eléctricas opuestas, ellos se atraen entre sí. Sin embargo, se sabe que una carga eléctrica en una trayectoria circular necesariamente emite radiación; pero ésta no es observada. La mecánica cuántica viene a explicar éste hecho, al mostrar que la forma en que el electrón puede desprenderse de energía por radiación no es un continuo sino que adquiere valores discretos.

El siguiente elemento en complejidad es el Helio, el cual consiste de dos protones en el núcleo y dos electrones orbitando. Dependiendo de las condiciones de formación, el núcleo también contiene uno o dos neutrones (denominados ^3He o ^4He). Aquí resalta un posible problema, pues los protones por tener cargas iguales deben sentir una repulsión electromagnética entre sí, lo que haría que el Helio se destruyera; pero eso no sucede. Una interacción adicional, lo suficientemente fuerte, actúa de forma tal que, a pesar de la repulsión electromagnética, los protones se mantienen dentro del núcleo. Esta es llamada la interacción nuclear (o fuerte), la cual veremos en detalle mas adelante.

Elemento	Masa	Carga eléctrica	Espín
Electrón	$M_e = 9.1 \times 10^{-31}$Kg	-e	1/2
Protón	1836 M_e	+e	1/2
Neutrón	1840 M_e	0	1/2

Tabla 1: Algunas propiedades de los componentes del átomo. e es la unidad de carga del positrón.

Con esta información, entendemos que los diferentes átomos que conforman a los elementos de la Tabla periódica son objetos que se van formando con distintas proporciones de protones y neutrones en el núcleo. Esto constituye la base de la materia que forma todos los objetos de nuestro entorno. En la tabla periódica existen elementos que no son estables, es decir, la atracción nuclear no es lo suficientemente fuerte para mantener a todos los protones y neutrones juntos, típicamente por el exceso de estos respecto a los protones, por lo que el núcleo se desprende de neutrones favoreciendo que exista un número igual de protones y neutrones. Esto es conocido como la energía de simetría.

La observación de que la masa del protón y el neutrón son muy cercanas una de otra sugiere que existe una simetría en donde, si no consideramos sus cargas eléctricas, ambas partículas pueden ser vistas como un solo estado, el cual bajo la acción de la interacción electromagnética se desdobla (se proyecta) en dos componentes: el protón y el neutrón . Este efecto es similar al desdoblamiento de un estado de espín 1/2 bajo la acción de un campo magnético (efecto Zeeman). A esta propiedad se le llama *Isoespin* (I). El protón y el

neutrón se describen entonces como componentes de un estado de Isoespín $I = 1/2$ y la tercera componente (I_3) distingue a uno del otro, $I_3 = 1/2$ para el protón y $I_3 = -1/2$ para el neutrón. El conocimiento de estas propiedades nos ha permitido hacer aplicaciones que impactan directamente en nuestra vida diaria. El hecho de que haya elementos inestables no les resta aplicabilidad, por ejemplo los llamados elementos radiactivos tienen una amplia aplicación en el sector médico, como elementos útiles en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades. También se utilizan para la generación de energía, etcétera.

4. Comportamiento de los componentes del átomo

El estudio de los electrones, hasta el momento, muestra que éste no tiene estructura y su tamaño es menor a 10^{-22} metros, por lo que se le considera como una partícula puntual, es decir este es uno de los objetos últimos con esas propiedades. Objetos similares al electrón, pero que difieren en la masa, son el muón (μ) con una masa de 206 M_e y el tau (τ) con una masa de 3477 M_e [2]. Veamos ahora la estructura de los componentes de los núcleos atómicos. Más allá de la complejidad que representa estudiar el núcleo como un sistema de muchos cuerpos, éste está basado en el conocimiento de las propiedades de los protones y neutrones que lo constituyen. Habíamos mencionado que el núcleo puede desprenderse de neutrones para aumentar su estabilidad, sin embargo, también se observa que en algunos casos los núcleos emiten un electrón (e) mientras que aumentan su número de protones (Z), esto ocurre en un tiempo relativamente largo respecto al tiempo que los electrones dan sus saltos en la escalera de energía y a los procesos de interacción fuerte, este es el fenómeno llamado decaimiento beta nuclear y es un ejemplo típico de la llamada interacción débil, la cual permite que protones, neutrones y electrones interactúen entre sí.

Para sistematizar la descripción de estos fenómenos, se han creado modelos teóricos cada vez más elaborados. En 1935, Hideki Yukawa propuso que la interacción fuerte entre nucleones procede a través del intercambio de una partícula de espín cero (denominada también escalar) en el núcleo atómico. Esto lo podemos escribir en una teoría utilizando el formalismo Lagrangiano (básicamente el Lagrangiano es una función de la forma $L \equiv T - V$, donde T es la energía cinética y V es el potencial de interacción) como un término de la siguiente forma:

$$L_Y = g_Y \bar{\Psi} \phi \Psi \tag{1}$$

en donde Ψ representa al nucleón que decae, $\bar{\Psi}$ representa al nucleón que se crea, ϕ a la partícula escalar y g_Y es la intensidad con que interactúan. Este corresponde a un potencial de la forma

$$V_Y(r) = -\frac{g_Y^2}{4\pi r} e^{-m_\phi r} \tag{2}$$

el cual es atractivo y para un rango del orden de 1 Fermi (1 Fermi = 1×10^{-15} m) le debe corresponder una masa del orden de $m_\phi \approx 190 MeV/c^2$. Experimentalmente se determinó que ésta partícula es el pión (π) con masa $m_\pi = 134 MeV/c^2$.

Posteriormente, al colisionar protones con protones se encontraron evidencias de otros objetos parecidos al protón y al neutrón. El término *Hadrones* se utiliza para refererirse a los objetos que interactúan a través de la interacción fuerte. Estos se clasifican en dos grupos según su número cuántico de espín: *bariones* (semi-entero) y *mesones* (entero) y se asigna un número bariónico igual a 1 para bariones y 0 para los mesones.

El decaimiento beta del neutrón por su parte fué descrito en 1933 por Enrico Fermi vía un término de interacción de la forma:

$$L_{Fermi} = G_{Fermi}(\bar{\Psi}_N \Gamma \Psi_N)(\bar{\Psi}_l \Gamma \Psi_l) \tag{3}$$

donde Γ es un elemento que especifica la forma de la interacción, cuyos detalles no son relevantes por el momento y G_{Fermi} es la magnitud de la interacción. Los subíndices representan a los nucleones (N) y a los leptones (l), estos últimos son el electrón y otra partícula que en su momento no era observable y se le denominó neutrino. La clasificación completa de leptones incluye al muón y al tau con sus correspondientes neutrinos. La teoría de Fermi, si bien describe el decaimiento beta apropiadamente, al calcular procesos de dispersión se obtiene que la sección eficaz crece proporcional a la energía al cuadrado, lo cual limita su validez a valores de energía que no violen la unitariedad de la teoría, es decir que la probabilidad de que ocurra el proceso sea menor que 1, correspondiendo a valores alrededor de 100 GeV. Con la proliferación de hadrones y los problemas inherentes a las formulaciones teóricas de ese tiempo, se podía pensar que posiblemente el protón y el neutrón no eran los elementos últimos en la cadena de la estructura de la materia. Un nuevo salto en el desarrollo del conocimiento estaba en puerta.

5. El surgimiento de la idea de partones

Uno de los primeros indicios de que el protón tiene estructura fué la observación de que al colisionar protones a energías mayores a 10 GeV (en el sistema centro de masa) se produce un número grande de piones con momentos casi colineales con el eje de la colisión, a pesar de que en principio estos pueden emitirse en cualquier dirección. Esto se puede explicar si consideramos que los hadrones, como el protón, están compuestos de otros elementos, así, en lugar de tener una colisión entre objetos como bolas de billar, se tiene una colisión entre objetos que se pueden interpenetrar y por lo tanto los productos son preferentemente colineales, pues la probabilidad de que cada uno de los elementos de un protón colisione de frente con uno del protón opuesto es muy baja. Otra evidencia indirecta, como ya hemos mencionado, fué la proliferación de descubrimientos de mas hadrones, el hecho de que fueran tantos y lo aprendido a nivel atómico sugería que estos debían poder describirse usando un número reducido de componentes. A estos compo-

Quark			Carga eléctrica	No. bariónico	Espín
u	c	t	+2/3	1/3	1/2
d	s	b	-1/3	1/3	1/2

Tabla 2: Propiedades de los Quarks

nentes se les denominó *partones*. Actualmente, estos constituyentes son llamados quarks (q).

Un Barión está constituido por tres quarks (qqq) de forma que el número bariónico de un quark es 1/3. Las antipartículas correspondientes, o antiquarks ($\bar{q}$) tienen número bariónico -1/3. Los mesónes están constituidos por un quark y un antiquark ($q\bar{q}$) y por lo tanto el número bariónico es cero.

Los primeros quarks establecidos corresponden al quark up (u) y al quark down (d) el protón está formado por dos quarks u y un quark d (uud) y el neutrón por dos quarks d y un quark u (ddu). De esta manera, todos los elementos de la tabla periódica, y por ende nuestro entorno, está básicamente constituido por estos elementos fundamentales.

El incremento de la región de energía que los experimentos pudieron explorar, dio origen al descubrimiento de otros hadrones que requieren la existencia de otros tipos de quarks. Para la interacción fuerte la diferencia entre ellos es solamente energética, por lo que sólo da indicios de su masa. A través de la interacción débil se puede distinguir que son diferentes tipos de quarks, no solo por su masa, sino también por la forma en que interactúan. Adicionales al u y d, existen los quarks s, c, b y t (ver Tabla 2).

La carga eléctrica de los quarks es una fracción de la carga eléctrica del electrón (en magnitud). Se puede verificar esta propiedad comparando las predicciones de la probabilidad de que un mesón decaiga produciendo un electrón y un positrón (la anti-partícula del electrón), con los valores experimentales. Considerando que este procede vía la aniquilación de los quarks en un fotón, la cual es proporcional a la carga de estos, con la subsecuente creación del electrón y el positrón a partir del fotón.

Los quarks son partículas de espín 1/2. Esto puede ser determinado observando la distribución angular de la dispersión $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ comparada con $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, como los muones tienen espín 1/2, excepto por las diferencias de masa, los espectros deben ser similares.

La necesidad de un número cuántico adicional surge al comparar un barión formado por tres quarks iguales, consideremos por ejemplo el quark u, este tendrá una carga eléctrica 2/3+2/3+2/3=+2 y espín 1/2 o 3/2 (usando las reglas de suma de momento angular). Note que, como todos los quarks son iguales, no podemos distinguir a uno de otro y por lo tanto decimos que el estado formado es simétrico. Sin embargo, dado que es una partícula de espín fraccionario, la descripción cuántica nos dice que este debe ser un estado antisimétrico (Teorema espín-estadística). Para conciliar estos dos hechos, se propuso

que cada quark debe existir en tres tipos distinguibles debido a una propiedad adicional, tal que la combinación de estos es neutra. Mas de tres daría la posibilidad de distinguirlos con ese número cuántico en los grupos formados por tres quarks, lo cual no se observa. Por analogía con los tres colores primarios, a esta propiedad se le denominó el *c*olor, y se denota por sus siglas en inglés como Rojo (R), Azul (B) y Verde (G), de forma que su combinación es neutra de color o blanca.

$$R + B + G = Neutro$$

Experimentalmente, la comparación de las secciones eficaces de la aniquilación de un par electrón-positrón produciendo hadrones con respecto a la de la producción de un par muón-antimuón

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \to hadrones)}{\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)} = \sum_{q=u,d,s,...} e_q^2, \tag{4}$$

indica que esta consideración es correcta. En esta ecuación, si consideramos solo quarks u, d y s en ausencia de color, se tiene que $R = 2/3$ mientras que con color $R = 2$, esta última corresponde con la observación experimental.

La evidencia de la existencia de otras partículas, llamadas gluones, surge de la dispersión electrón-nucleón, la cual ocurre vía la interacción electromagnética. Así, a bajas energías (longitud de onda mayor al tamaño del protón) el fotón intercambiado solo ve la carga eléctrica del protón, conforme se aumenta la energía (longitud de onda menor que el tamaño del protón) el fotón puede sondear la estructura interna del protón y romperlo, esto es lo que se denomina la dispersión inelástica profunda. Este proceso indica que las partículas que participan en la dispersión interactuando débilmente y eléctricamente llevan solamente alrededor de la mitad del momento del nucleón. Es decir, algo mas, que es inerte a estas interacciónes y se identifica con los gluones lleva el resto del momento. La observación de tres chorros de hadrones en la aniquilación de un electrón y un positrón se identifica con la emisión de un gluón adicional a un par quark-antiquark.

Con estos elementos en juego, nuevas estructuras de la materia se predijeron y siguen siendo descubiertas. La forma en que se pueden representar sistemáticamente invocan propiedades de simetría asociadas con las masas de los quarks, de manera muy similar a como el protón y el neutrón son representados como componentes de un solo estado.

Como ejemplo, en la figura 1 (a) se muestran aquellos mesones formados por quarks u, d y s, como función de su tercera componente de isoespín y extrañeza, el cual corresponde al contenido de quarks extraños (al quark s le corresponde una extrañeza -1, y el opuesto a su antipartícula), bajo la suposición de que $m_u = m_d = m_s$. El quark y el antiquark tienen sus espines anti-alineados, es decir en total tienen espín 1/2-1/2=0, adicionalmente tienen la propiedad de que ante el intercambio de sus coordenadas espaciales ($\mathbf{r} \to -\mathbf{r}$ el estado formado cambia de signo. Por esas características, se les llama mesones pseudoescalares. Una combinación similar de quarks pero con los espines alineados, es decir, con espín total 1 se denominan mesones vectoriales. De manera análoga, se pueden formar estados

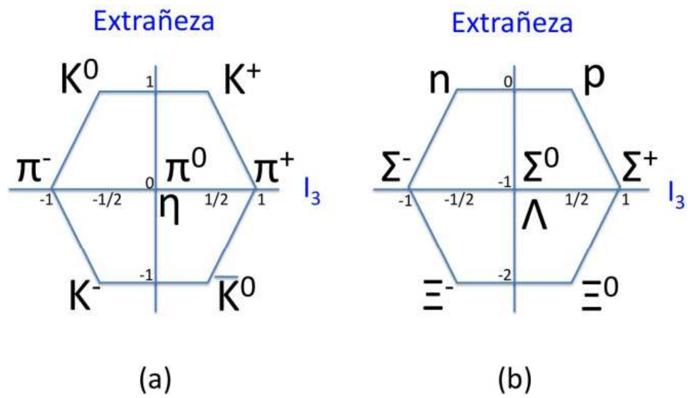


Figura 1: a) Mesones pseudoescalares, b) Bariones de espín 1/2.

bariónicos, en cuyo caso los estados que forman pueden ser de espín 1/2 o 3/2, el caso más sencillo es el de espín 1/2, como lo son el protón y el neutrón . En la figura 1 (b) se muestra un ejemplo de estos. Esto constituye la base del llamado modelo de quarks para describir a los hadrones [3].

Hadrones que contienen quarks más pesados se siguen descubriendo. Aquellos con quarks b ofrecen un potencial interesante para entender cómo se transforma un quark pesado en otro más ligero, hasta llegar a los estados formados por quarks u y d que forman nuestro entorno. Además, la descripción teórica actual requiere que algunos fenómenos observados en hadrones ligeros como la violación de la simetría de conjugación de carga y paridad (CP) tenga el mismo origen para el caso de hadrones pesados, lo cual está en proceso de estudio.

Vale la pena mencionar que experimentos como BABAR en Estados Unidos y BELLE en Japón han ya explorado esta área y están en desarrollo nuevos experimentos, las llamadas fábricas de B, como superKEKB en Japón, dedicados exclusivamente a estudiar este tipo de partículas.

6. La interacción fuerte como teoría de norma

La interacción fuerte entre quarks, con todos las propiedades que hemos descrito anteriormente, puede describirse a través del Lagrangiano correspondiente y de sus propiedades de simetría. En particular, el Lagrangiano debe ser invariante bajo el grupo de simetría SU(3), asociada a la simetría de color que ya hemos discutido, la cual es exacta pues no se observa ningún hadrón que tenga color. En la práctica esto corresponde a aplicar una *transformación de norma local* a los campos que describen a los quarks en el Lagrangiano sin interacciones, de la forma:

$$\Psi \rightarrow e^{-ig_s T^a \theta_a(x)} \Psi,$$

en donde g_s es un parámetro constante, T^a corresponde a los 8 generadores del grupo de simetría SU(3),(a=1,2,3,...8). $\theta_a(x)$ son 8 parámetros que dependen de la posición. Para garantizar que el Lagrangiano que describe a los quarks sea invariante ante dicha transformación se necesita que existan partículas de espín 1 sin masa, también llamados campos de norma (los gluones) en un número igual al número de generadores del grupo, éstos son los responsable del intercambio de color (o carga de color) entre quarks, es decir, de que existan las interacciones. Un punto importante en esta descripción es que los gluones llevan carga de color y por lo tanto pueden interactuar entre ellos. Esta formulación es llamada la cromodinámica cuántica o QCD (por sus siglas en inglés).

El parámetro de acoplamiento $\alpha_s \equiv g_s^2/4\pi$ depende de la energía a la que se mida. Esto tiene que ver con la posibilidad de que a una energía dada los efectos cuánticos asociados a la creación y aniquilación de partículas tienen un efecto neto no nulo, análogo al apantallamiento de las cargas eléctricas por efecto de la polarización del medio. La dependencia en energía tiene la siguiente forma [4]:

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{\alpha_s(\mu^2)}{1 + \frac{\alpha_s(\mu^2)}{12\pi}(33 - 2n_f)Log(Q^2/\mu^2)} \tag{5}$$

donde μ es una escala de energía de referencia, a la cuál se realiza una medición, n_f es el número de sabores o tipos de quarks. Note que, dado que en el denominador se tiene la suma de un término que crece logarítmicamente, este parámetro disminuye para altas energías, lo que significa que los quarks interactúan entre sí cada vez menos intensamente y por lo tanto decimos que la teoría es *asintóticamente libre*. Por el contrario, a bajas energías este parámetro crece y la energía necesaria para vencer esa interacción y separar a los quarks es tan grande que es energéticamente más favorable producir un par quark-antiquark que tener a los quarks separados, este fenómeno es llamado *confinamiento*. En la figura 2 se muestra este comportamiento estimado teóricamente y diferentes mediciones experimentales los cuales se distribuyen según lo predicho [2].

En la región de confinamiento, los quarks de manera efectiva son mejor descritos en términos de los hadrones que forman, mas aún, dado que la constante de acoplamiento es grande, el uso de los métodos perturbativos para calcular las probabilidades de que ocurran los diferentes procesos no son aplicables, por lo que es común también referirse a esta región como *no-perturbativa*. También es importante señalar que es todavía un reto teórico calcular las propiedades de los hadrones a partir de QCD, los avances más sólidos vienen a través de cálculos numéricos utilizando una discretización del espacio (lattice-QCD). Por otra parte, en el régimen en el que los métodos perturbativos son aplicables, los resultados experimentales concuerdan con las predicciones de QCD.

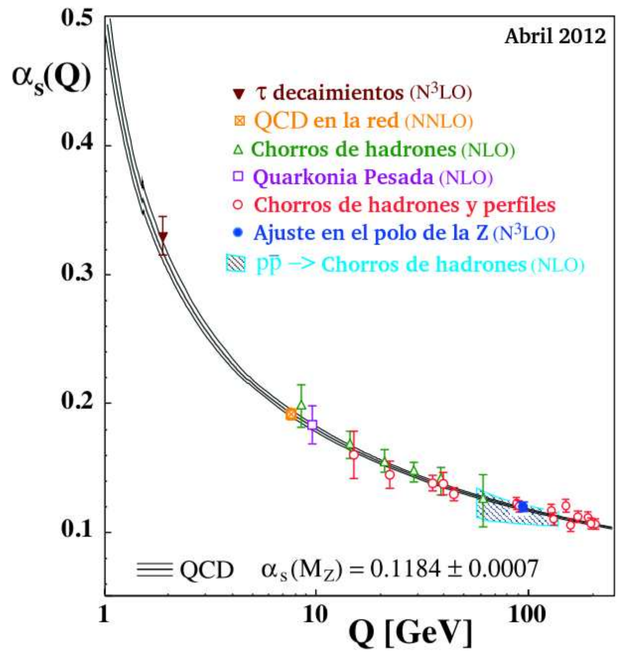


Figura 2: Evolución de la constante de acoplamiento fuerte, tomado de [2].

7. Hiperones e Hipernúcleos

El quark s o extraño es el siguiente quark más pesado que los quarks u y d. Podemos trazar el origen de este quark a la observación del proceso $\pi^- + p \to k^+ + \Sigma^-$. Los hadrones finales contienen un antiquark $\bar{s}$ y un quark s respectivamente (ver figura 1). A los bariones que contienen por lo menos un quark extraño se les denomina *hiperones*. En la figura 1(b) se presentan algunos de los hiperones formados por combinaciones de quarks u, d y s en distintas proporciones. Por ejemplo, al hiperón Λ^0 lo podemos visualizar de manera simplista como un neutrón al cual se le ha quitado un quark d y se le ha sustituido por un quark s, figura 3. Este cambio, aparentemente simple, ofrece una inmensa variedad de posibilidades en la formación de nuevos estados. Supongamos que tenemos un núcleo formado por protones y neutrones ¿Qué pasa si en lugar de uno de ellos el núcleo contiene otro barión con propiedades distintas? El caso más sencillo es que se trate de un hiperón, si este es capturado por un núcleo se forma lo que llamamos un *hipernúcleo*, un estado que tiene propiedades completamente distintas a cualquier núcleo de los elementos conocidos. Es decir, tendríamos una tabla periódica tridimensional cuyo nuevo eje corresponde al contenido de extrañeza o hiperones.

Este tipo de núcleos es ya una realidad, un hipernúcleo puede ser producido por colisiones de hadrones o fotones con un núcleo, compuesto solo de protones y neutrones, en el cual se producen y/o intercambian quarks extraños. Un ejemplo es el hipertritón

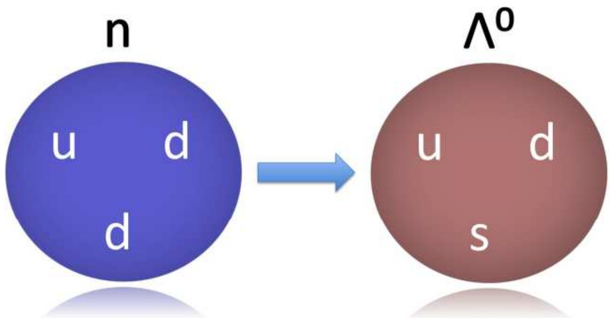


Figura 3: Neutrón e Hiperón Λ.

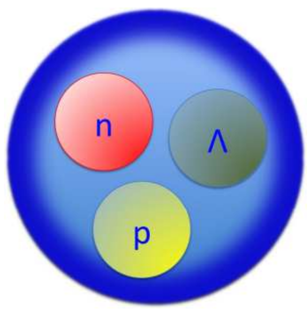


Figura 4: Hipernúcleo.

${}^{3}_{1}H_{\Lambda}$ (en donde usamos la notación ${}^{A}_{Z}E_{Y}$, con A= No. de bariones en el núcleo, Z=No. de protones, Y= Hiperón) que está formado por tres elementos y uno de ellos es un hiperón Λ, figura 4 (un protón, un neutrón y una Λ). Como la Λ decae emitiendo un pión y un protón, el hipernúcleo se transforma de la siguiente manera:

$$ {}^{3}_{1}H_{\Lambda} \rightarrow \pi^{-} +^{3}_{1} H_{e} $$

La observación de este decaimiento indica la formación del hipernúcleo. Este es el primer tipo de hipernúcleo en el que se ha estudiado el efecto debido a otro sabor. Adicional a las posibilidades de nuevos estados, este tipo de procesos representa una herramienta muy útil para estudiar las interacciones entre hiperones y nucleones (YN) e hiperones con hiperones (YY) las cuales son muy difíciles de estudiar en procesos de dispersión. Estudios de este tipo de estados se han realizado y continúan en estudio por las colaboraciones STAR en RHIC, ALICE en el LHC, JLAB en Estados Unidos y FINUDA en Italia entre otros [5, 6].

8. Estados exóticos

La existencia de hadrones multiquark más allá de los tipos de mesones ($q\bar{q}$) y bariones (qqq), como los que hemos discutido anteriormente, ha sido una pregunta desde el comienzo del Modelo de quarks. La observación de que *todas los grupos de quarks en la naturaleza son incoloras*, nos permitió entender que los tres colores (anticolores) se encuentran en la misma cantidad, o que la cantidad neta de cada color es cero, con los mesones (R-antiR) y bariones (RBG) siendo los ejemplos más simples. Sin embargo, las combinaciones de quarks permitidas por la neutralidad de color son más diversas, y en general tienen la forma:

$$(3q)^p(q\bar{q})^n; \quad (p, n \geq 0)$$

Las combinaciones que usualmente se observan son los casos para $p = 1,\ n = 0$ o $p = 0,\ n = 1$. Los otros casos corresponden a los denominados estados *exóticos*. Por ejemplo, $qq\bar{q}\bar{q}$ ($p = 0,\ n = 2$) conocido como tetraquark, y $qqqq\bar{q}$ ($p = 1,\ n = 1$) conocido como pentaquark, corresponden a un mesón y un barión exótico respectivamente. Como los gluones también llevan carga de color, esta regla puede ser ampliada de forma tal que se mantenga la condición de que la combinación es incolora. Por ejemplo, un estado formado por 3 gluones (no es ni barión ni mesón), es un estado exótico al cual se le denomina por su nombre en inglés como *glueball*. Los mesones con números cuánticos exóticos pueden ser de distintos tipos: mesones híbridos $(q\bar{q}g)$, estados multiquark $(q\bar{q}q\bar{q}...)$ o estados multimesón $(M_1, M_2, ...)$. Estos estados son de gran importancia para entender mejor a la interacción fuerte ya que, dado que estamos en el régimen no perturbativo, se tienen que construir modelos que capturen las propiedades más relevantes de QCD y con ellas predecir las propiedades de estos estados. Más aún, la forma en que los gluones se combinan también requiere de un conocimiento de la forma en que está construida la teoría.

Para ejemplificar este tipo de estudios, consideremos cómo se puede formar un estado tetraquark a partir de 2 mesones, fijándonos en dos propiedades de QCD:

- Sólo singletes de color pueden existir como partículas observables.
- Sólo algunas combinaciones de estados de color tienen un potencial atractivo, produciendo un estado ligado

Como un quark puede estar en tres estados de color distinto, se dice que corresponde a un triplete de color (3_C). Los estados que pueden formarse con quarks y antiquarks deben ser singuletes de color, es decir neutros. En particular, la combinación de dos quarks, llamado *diquark* (qq'), corresponde a dos tripletes de color, $3_C \otimes 3_C$ los cuales, siguiendo las reglas de la combinación de representaciones de la teoría de grupos para el caso de SU(3), produce un objeto que tiene seis posibilidades o sextete y también un triplete de color. Es decir, estas combinaciones tienen color. Si hacemos la combinación de un diquark y un anti-diquark se puede producir entre otras combinaciones un singulete de color; este es nuestro *tetraquark*. El potencial que liga a los quarks en un tetraquark es consistente con

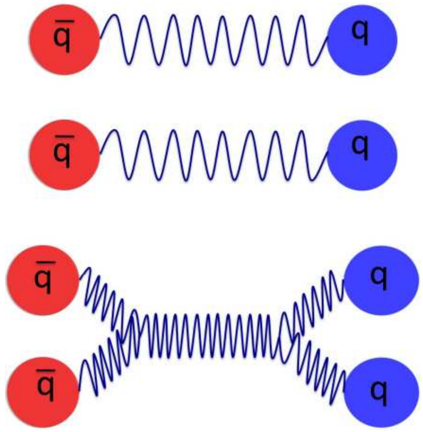


Figura 5: Modelo de flujo gluónico para el estado tetraquark, comparado con el caso de formación de dos mesones.

la imagen de la formación de un flujo gluónico como lo muestra la figura 5. Por supuesto, este estado debe tener menor energía que el estado de dos mesones para que sea estable, de otra manera haría una transición al estado de dos mesones. Para calcular la energía correspondiente existen distintos tratamientos que dependen del tipo de aproximaciones que se quieran considerar. En el caso que ejemplificamos, entre otras cosas, se requiere determinar la posición de los vértices que unen a los diferentes flujos gluónicos, tales que minimicen la energía potencial. Adicionalmente, en todos los casos se tienen que incorporar las propiedades de espín y sabor de los quarks involucrados. Existen abundantes análisis en la literatura [7] que involucran la mezcla de estados de mesón, glueballs e híbridos utilizando una variedad de métodos incluyendo teoría de perturbaciones, integrales de Feynman-Schwinger relativistas, lattice QCD y aproximaciones quirales efectivas. En años recientes, varios candidatos a hadrones multiquark han sido experimentalmente observados: $\Theta^+(1540)$, $\Xi^{--}(1862)$, y $\Theta_C(3099)$, son candidatos a ser estados pentaquark. $X(3872)$ y $D_s(2317)$ son candidatos a tetraquark [7], y más recientemente $Z_b^+(10610)$ y $Z_b^+(10650)$. Estados exóticos, podrían ser descubiertos en el sector de los quarks pesados, experimentos como superKEKB en breve (2017) esperan tomar datos que podrían ser reveladores de nuevos fenómenos.

9. Materia en condiciones extremas

Consideremos ahora qué pasa si la materia es llevada a condiciones extremas de densidad y/o temperatura. Dado que el acoplamiento fuerte depende de la energía, esperamos que los fenómenos sean muy diferentes a los que ocurren en condiciones normales. Para ubicarnos, la densidad nuclear normal es de alrededor de 0.2 GeV/fm^3 a temperatura

ambiente. Si incrementamos la energía, la cual es directamente proporcional a la temperatura, podemos entrar a la región de desconfinamiento, en donde los quarks interactúan muy débilmente unos con otros; esto puede ser logrado haciendo colisionar núcleos pesados a altas energías, como lo ha hecho ya el experimento SPS en el RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) y es el programa de investigación principal en el experimento ALICE en el LHC (Large Hadron Collider). El estado que se forma durante la colisión se denomina el plasma de quarks y gluones, cuya formación puede ser inferida por la observación de un leptón y su antileptón, que por no interactuar fuertemente, presentan propiedades de este medio en el que se formaron, sin alteraciones por efectos de interacción fuerte. Otra observable que puede indicar que este estado se ha formado es la observación de la supresión de la formación de estados $c\bar{c}$ (también conocidos como J/ψ), la cual se espera que sea inhibida por este medio, en el cual es más favorable que un quark pesado como el c se acople a uno de los abundantes quarks ligeros en lugar de a otro pesado [8].

Si bien el incremento de la energía es una forma de entender la evolución de la interacción fuerte, el incremento en densidad tiene propiedades análogas. Podemos ver esto en el hecho de que al colisionar dos iones, lo que estamos haciendo es poner a uno muy cerca del otro. Este es un mecanismo que la naturaleza realiza de manera eficiente en las estrellas de neutrones. Para darnos una idea de las condiciones en que se encuentra la materia en tales estrellas, basta mencionar que contienen la cantidad de materia de aproximadamente un sol y medio pero en un radio de aproximadamente 10 Km, con temperaturas que relativas a las energías asociadas a las masas de las partículas que la conforman es prácticamente nula! Saber cómo se comporta la materia en este medio extremadamente denso constituye la principal interrogante para entender las propiedades de la estrella, figura 6. Sabemos que la parte más externa está formada por núcleos pesados, pero conforme vamos hacia el interior la densidad empieza a crecer muy rápidamente, de forma que los núcleos pierden su identidad y los nucleones y electrones empiezan a formar otras estructuras que van buscando condiciones de energía más estables. Se considera que los hiperones en el interior de las estrellas de neutrones aparecen a densidades de alrededor de 2 a 3 veces la densidad nuclear normal, dependiendo de la interacción entre nucleones e hiperones. Así, el estudio de los hipernúcleos puede servir como laboratorio para determinar esta interacción y por lo tanto incrementar nuestro entendimiento de las propiedades de los objetos macroscópicos que forman.

En la parte central de la estrella se pueden alcanzar densidades de hasta 10 veces la densidad nuclear normal, lo cual puede hacer que incluso los nucleones pierdan su identidad, volviéndose una mezcla de quarks y gluones, en la cual no solo los quarks u y d pueden estar presentes sino también los quarks s. A una estrella que tenga esta estructura puramente de quarks, se le denomina estrella extraña. Aquellas que presentan combinaciones de nucleones, hiperones y/o quarks se denominan mixtas. Una indicación de que una estrella tiene ese tipo de estructura interna es la observación de estrellas muy parecidas en masa a una estrella de neutrones pero con un radio menor, alrededor de 7 km.. Estas predicciones dependen fuertemente de la forma en que se modelan las estructuras

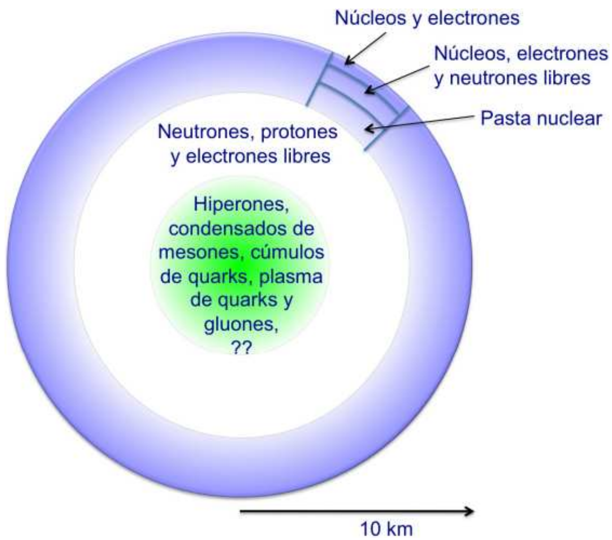


Figura 6: Perfil de la estructura de una estrella de neutrones.

de la materia, las cuales incluyen entre otras la simulación numérica, y son un tema muy activo de investigación teórica y experimental [9]. Hasta ahora no se ha confirmado la observación de ninguna estrella extraña, pero el incremento en la capacidad observacional ha puesto este tipo de estudios dentro del rango en que pueda ser verificable en el mediano plazo.

10. Perspectivas

La búsqueda del elemento último nos ha llevado a descubrir una gran diversidad de partículas. El conocimiento de sus propiedades nos ha permitido describirlas en términos de un grupo reducido de ellas. A saber, los quarks, los leptones y los mediadores de sus interacciones. Desde la concepción del átomo hasta la estructura del núcleo, se han enriquecido con la incorporación de más tipos de quarks, además de los quarks u y d. Hipernúcleos, estrellas de quarks o extrañas, estados exóticos como los tetraquarks y pentaquarks, el plasma de quarks y gluones, entre otros, serán sin duda parte central en las investigaciones de este siglo, con un gran potencial para enriquecer nuestro entendimiento de cómo se forman nuevas estructuras de la materia y sus aplicaciones en diversos ámbitos.

11. Referencias

[1] G. Patterson, "Jean perrin and the triumph of the atomic doctrine," *Endeavour*, vol. 31, no. 2, pp. 50–53, 2007.

[2] J. Beringer, J. Arguin, R. Barnett, K. Copic, O. Dahl, D. Groom, C. Lin, J. Lys, H. Murayama, C. Wohl *et al.*, "Review of particle physics," *Physical Review D*, vol. 86, no. 1, p. 010001, 2012.

[3] F. Halzen and A. D. Martin, *Quark & Leptons: an Introductory Course in Modern Particle Physics*. John Wiley & Sons, 2008.

[4] M. E. Peskin and D. V. Schroeder, *Quantum field theory*. Perseus Books (Reading, Massachusetts, 1995.

[5] T. Nagae, "Experimental progress in hypernuclear physics," *Progress of Theoretical Physics Supplement*, vol. 185, pp. 299–314, 2010.

[6] J. Pochodzalla, "Hypernuclei - the next decade," *Acta Phys. Polon. B*, vol. 42, pp. 833–842, 2011.

[7] F. Renga, "Signatures of exotic hadrons," *International Journal of Modern Physics A*, vol. 26, no. 29, pp. 4855–4879, 2011.

[8] J. Letessier and J. Rafelski, *Hadrons and quark-gluon plasma*. Cambridge University Press, 2002.

[9] N. K. Glendenning, *Compact stars: Nuclear physics, particle physics, and general relativity*. Springer Verlag, 2000.